



Středoškolská technika 2024

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Bioplynem k vodíku

Martin Obšil, David Orlík, Jonáš Tomešek

Wichterlovo gymnázium

Ostrava-Poruba, příspěvková organizace, Čs. exilu 669, 708 00 Ostrava 8

Poděkování

Rádi bychom poděkovali paní RNDr. Jitce Bukovanské za nabídnutí účasti na energetické olympiádě, díky které měl tento projekt vůbec šanci vzniknout.

Anotace

Tato práce se zabývá problematikou udržitelných zdrojů energie, a to především bioplynovými stanicemi a využitím vodíku. Naším cílem bylo vytvoření alternativního způsobu výroby vodíku, který zároveň řeší problém uvolňování methanu a dalších skleníkových plynů vznikajících při tlení organického materiálu. Námi zpracovaný projekt by byl nejen ekologický, nýbrž i velmi výnosný po ekonomické stránce. Ač jsme tedy neměli mnoho možností ověření dat v praxi, prezentovali jsme náš projekt již například odborníkům na ministerstvu průmyslu a obchodu, kde byl přijat jako potenciálně perspektivní.

Klíčová slova

bioplynová stanice; pyrolýza; vodík; udržitelnost; výnosnost

Annotation

This study focuses on the issue of sustainable energy sources, especially biogas stations and the usage of hydrogen. Our goal was to come up with an alternative way of producing hydrogen that also addresses the problem of releasing methane and other greenhouse gases from the decomposition of organic material. Our project would not only be environmentally friendly, but also very profitable economically. Although we have not had many opportunities to verify the data in practice, we have already presented our project to professionals at the Ministry of Industry and Trade, where it has been accepted as potentially viable.

Keywords

biogas station; pyrolysis; hydrogen; sustainability, profitability

Obsah

1	Úvod.....	6
2	Seznámení s problematikou	7
2.1	Výhody.....	7
2.1.1	Snížení emisí skleníkových plynů.....	7
2.1.2	Využití odpadu.....	7
2.1.3	Podpora zemědělství	7
2.2	Nevýhody	8
2.2.1	Nedostatek odbytu produktů	8
2.2.2	Emise	8
2.3	Proč vodík?.....	8
3	Technologie	8
3.1	Co je to anaerobní digesce?.....	9
3.1.1	Membránová separace	9
3.2	Rekuperace	9
3.3	Proč biometan a ne zemní plyn?	10
3.4	Pyrolýza methanu	11
3.4.1	Katalyzátory	11
3.5	Skladování vodíku.....	12
3.5.1	Skladování ostatních produktů	12
3.6	Anaerobní prostředí.....	12
4	Výnosnost	13
4.1	Výnosy bioplynu z jednotlivých zdrojů	14
4.1.1	Výnosnost vodíku z pyrolýzy methanu	14
4.1.2	Modelový příklad jedna	15
4.1.3	Modelový příklad dvě	15
4.2	Účinnost	15
4.3	Velikost pyrolytického kotle.....	16
5	Spotřeba.....	17
5.1	Výpočet spotřeby tepla.....	17
5.1.1	Výpočet spotřeby tepla při použití katalyzátoru	18
5.2	Možnosti ohřevu.....	18
5.2.1	Koks	18
5.2.2	Žhavení vodiče	18
5.2.3	Část bioplynu využít jako zdroj paliva.....	19
5.2.4	Další možnosti.....	19
5.3	Kompenzace v podobě výstavby vlastní solární farmy.....	19

5.4	Výpočet spotřeby na stlačování.....	19
6	Ekonomická návratnost	20
6.1	Investiční náklady	20
6.2	Zisk.....	22
6.2.1	Výnosy	22
6.2.2	Provozní náklady.....	23
7	Porovnání s ostatními možnostmi výroby vodíku.....	25
7.1	Srovnání s elektrolýzou	25
7.2	Srovnání s neekologickými způsoby výroby	25
8	Odbyt produktu	26
8.1	Výhodnost vodíkových vlaků.....	26
8.2	Využití vlaků	26
9	Realizovatelnost	27
10	Závěr.....	28
11	Použitá literatura	29
12	Seznam obrázků a tabulek:.....	31

1 Úvod

Téma ekologie a udržitelnosti se dotýká mnoha odvětví. Mezi oblasti, nacházející se pod největším drobnohledem veřejnosti a odborníků bez pochyby patří energetika a odpadové hospodářství. Jedním z výrazných témat posledních let byla stavba bioplynových stanic a jejich implementace ať už na výrobu elektrické energie či zapojení do stávajícího rozvodového systému. Tento fenomén šikovně řeší problém zpracování biologického odpadu, který by jinak přirozeným tlením produkoval značné množství skleníkových plynů, tím, že je přetvoří na bioplyn, alternativu zemního plynu. Problém však nastává při jeho spalování, kdy dochází k uvolňování oxidu uhličitého. Ačkoli tedy CO_2 není pro atmosféru zdaleka tak nebezpečný jako methan a vyloučené množství se přibližně rovná tomu, co se opět naváže do biologického materiálu, zanechává mnoho lidí v otázce bioplynových stanic skeptickými. Ty proto prozatím zůstávají spíše v takové “šedé zóně”.

Cílem naší práce je analyzovat současné výhody a nevýhody bioplynových stanic a představit řešení, jež by stávající výhody umocnilo a nevýhody vyřešilo. Spalování bioplynu totiž není jediná možnost, jak s ním naložit, jeho pyrolýzou lze vytvořit tzv. tyrkysový vodík, prvek, který mnozí vnímají jako budoucnost energetiky. Druhým produktem pyrolytického procesu jsou pak saze, které mají široké využití v mnoha průmyslových odvětvích. Nejednalo by se tedy o projekt pouze uhlíkově neutrální, ale dokonce negativní! Námi představenou metodu bezemisního zužitkování bioodpadu, se kterou jsme uspěli na Energetické olympiádě pořádané FEL ČVUT, a o kterou projevilo zájem i Ministerstvo průmyslu a obchodu, chceme detailně popsat a případně inovovat. Dále si ukládáme za cíl zhodnotit také ekonomickou návratnost projektu tak, aby nešlo pouze o ekologický, ale také výnosný projekt s šancí na úspěch v konkurenčním prostředí.

2 Seznámení s problematikou

Lidé jsou od přírody stvoření nápadité a vychytralé, proto kdykoliv se v dějinách objevil problém, se kterým si lidstvo muselo poradit, vždy se dříve či později našel někdo kdo tak učinil. Problém o velikosti globálního oteplování je sice bezprecedentní, nicméně si s ním musíme poradit bez rozdílů. Proto se začala z hlubin vynalézavosti vynořovat všelijaká řešení, která by nám mohla pomoci. Jedním z takových to řešení je výstavba bioplynových stanic.

Bioplynové stanice jsou technologická zařízení, která využívají procesu anaerobní digesce k zpracování bioodpadu nebo jiného biologicky rozložitelného materiálu. Hlavním produktem anaerobní digesce je bioplyn, který obsahuje metan a oxid uhličitý a lze ho využít jako alternativní zdroj energie.

Tato zařízení taktéž přinášejí řadu výhod pro životní prostředí, hospodářství a společnost, jako jsou:

2.1 Výhody

2.1.1 Snížení emisí skleníkových plynů

Bioplynové stanice snižují množství metanu, které by jinak unikalo do atmosféry z hnití organického materiálu. Toto číslo rozhodně není zanedbatelné, methan je silný skleníkový plyn, který má 28krát vyšší globální oteplovací potenciál než oxid uhličitý [5]. Celosvětově za rok zemědělský odpad vyprodukuje 20-40 milionů tun methanu¹ (20% veškerého metanu vypouštěného do atmosféry). Bioplynové stanice tak přispívají k plnění cílů Pařížské dohody o klimatu z roku 2015, která si klade za cíl udržet nárůst průměrné globální teploty pod dvěma stupni Celsia oproti předindustriální úrovni.

2.1.2 Využití odpadu

Bioplynové stanice umožňují efektivní využití bioodpadu, který by jinak končil na skládkách nebo byl spalován. Bioodpad tvoří značnou část komunálního odpadu v České republice, kde se ročně vyprodukuje asi 3,5 milionu tun bioodpadu. Bioplynové stanice tak snižují objem odpadu, který je třeba likvidovat, a zároveň z něj získávají cennou energii.

Produkce energie: Bioplynové stanice produkují bioplyn, který lze využít k výrobě elektřiny a tepla, nebo po úpravě k napájení plynové sítě nebo vozidel. Bioplynové stanice tak přispívají k zajištění udržitelného a spolehlivého energetického zásobování pro Evropu.

2.1.3 Podpora zemědělství

Bioplynové stanice mohou využívat jako substráty zemědělské produkty, jako jsou různé plodiny, hnůj nebo sláma, či zbytky z potravinářského průmyslu. Bioplynové stanice tak

¹Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. CH4 EMISSIONS FROM SOLID WASTE DISPOSAL [online]. [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/5_1_CH4_Solid_Waste.pdf

nabízejí zemědělcům nový zdroj příjmů, možnost recyklace živin a snížení nákladů na hnojiva a energie. Bioplynové stanice také podporují rozvoj venkova a vytvářejí nová pracovní místa.

Nic však není černobílé a také bioplynové stanice mají své mínusy.

2.2 Nevýhody

2.2.1 Nedostatek odbytu produktů

Často není odbyt pro vyrobené teplo, protože bioplynová stanice musí být blízko odběratele tepla nebo teplovodu. Tomu tak často není, jelikož stanice jsou nejčastěji umísťovány na venkově, kde není taková koncentrace zákazníků.

2.2.2 Emise

I přes to vše spalováním bioplynu stále vznikají emise CO₂, což z něj dělá zdroj energie nikoli bezemisní. Náš projekt míří na odstranění těchto problémů velice brilantním způsobem. Výstupním produktem námi předkládaného systému není bioplyn či biomethan, ale vodík. Ten se narozdíl od bioplynu nemusí spotřebovat přímo v místě výroby, jelikož se dá stlačit a jednoduše transportovat, a jeho spalováním vzniká pouze vodní pára. Jak tento proces výroby vodíku probíhá je detailně popsáno v následující kapitole.

2.3 Proč vodík?

Ve vzduchu se vznáší ještě jedna otázka. Proč vůbec používat vodík? Drahé, špatně uskladnitelné palivo, které je vysoce výbušné. Věřte, že vodík má velký potenciál pro budoucnost z několika důvodů:

1. Čistá energie: Vodík je lehký, energeticky hustý a neprodukuje žádné přímé emise škodlivin nebo skleníkových plynů. Při Jeho použití jako palivo je jediným produktem voda.
2. Různorodé využití: Vodík může najít uplatnění v sektorech, kde je nyní téměř zcela nepřítomen, jako je doprava, stavebnictví či energetika. Může například transformovat těžce znečišťující průmysly, jako je ocelářství a cementářství.
3. Uchovávání a přenos obnovitelné energie: Vodík může pomoci tím, že se do něj budou ukládat přebytky energie vzniklé z obnovitelných zdrojů. Funguje tedy jako dobře přenosný akumulátor.

3 Technologie

Námi předkládaná technologie stojí na využití anaerobní digesce pro výrobu zeleného vodíku pomocí pyrolýzy methanu. Výhodami tohoto systému, by byla zvýšená efektivita anaerobní digesce (obrázek 1.1), díky využití odpadního tepla vznikajícího při výrobě vodíku pomocí pyrolýzy methanu.

3.1 Co je to anaerobní digesce?

Princip anaerobní digesce je založen na rozkladu organického materiálu na bioplyn bakteriální mikroflórou a využívá jej de-facto každá bioplynová stanice. Tento proces, jako každý jiný, má i mnoho určujících faktorů. Napomáhá mu vyšší než pokojová teplota, nepřekračující však 60 °C, hodnota pH rozkládaných látek a klíčový je i poměr uhlíku a dusíku v dané organické sloučenině (dále jen C N poměr). V optimálním případě by tento poměr měl být 30:1². Dva základní produkty digesce označujeme jako bioplyn a digestát. Bioplyn se skládá až ze 70 % z methanu a postupným čištěním jej lze přetvořit na biomethan, jež má srovnatelný podíl methanu jako zemní plyn. V současnosti ale nebývá výjimkou, že zemní plyn v poměru obsaženého methanu i předčí. [viz kapitola 1.2]

3.1.1 Membránová separace

Bioplyn není pouze čistý methan, obsahuje stále velké množství oxidu uhličitého a dalších stopových prvků, které sice při spalování nepřekážejí, ale pro další nakládání s biomethanem nejsou příliš žádoucí. V našem případě potřebujeme pracovat s co nejčistším methanem, proto je pro nás stěžejní také metoda membránové separace, jež využívá různé průchodnosti látek membránou. Snadno, rychle a ekologicky tedy odděluje tížený biomethan od vedlejších produktů.

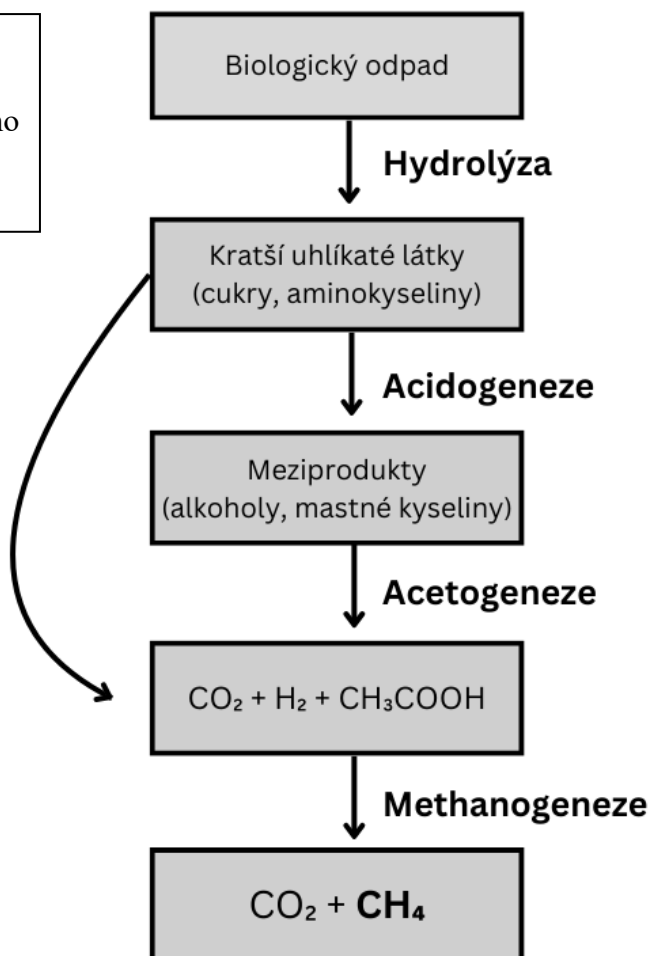
3.2 Rekuperace

Jak již bylo zmíněno, pro zefektivnění anaerobní digesce jsou vhodné vyšší teploty, a to přibližně 55 °C. Na svědomí to má převážně vyšší aktivita teplomilných anaerobních bakterií. U nás se ale spíše setkáme s destruenty pracujícími za nižších teplot, a to z jednoho prostého důvodu. Vytápění stanice by sice zrychlilo dobu rozkladu, ale nikoli do takové míry, aby se ekonomicky vytápění továrny vyplatilo. Náš projekt je však specifický v tom, že kombinuje několik technologií. V pozdějších kapitolách bude popsán pyrolytický kotel, kde bude náš meziprodukt zahříván na 700-1100 °C s výstupními produkty dosahujícími stejné teploty. Ty bude nutné ochladit a vzniklé odpadní teplo lze poté využít pomocí principu rekuperace na zahřívání fermentoru.

² PŘÍDAL, Štěpán. PŘÍPADOVÁ STUDIE – BIOPLYNOVÁ STANICE V ÚPICI. Online. Dostupné z: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/30253/DPTX_2009_1__0_199565_0_81762.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [cit. 2024-02-11].

Obr.1.1 Anaerobní digesce

Zjednodušené schéma klíčového procesu bioplynové stanice.



Obrázek 1: Anaerobní digesce

3.3 Proč ne zemní plyn?

Zatímco složka methanu v zemním plynu se pohybuje v rozmezí 88 % - 99,8 %³, tak procentuální složka methanu v biomethanu musí vždy převyšovat 95 %⁴. Tyto dvě skutečnosti poukazují na pozoruhodný fakt, že biomethan může, a z pravidla také obsahuje větší množství methanu, a jeví se tedy jako lepší výchozí surovina, než zemní plyn. Naši snahou samozřejmě není jen lepší vstupní produkt, ale i udržitelnost celého projektu, kterou by biomethan mohl poskytnout. Ačkoliv je totiž zemní plyn často prezentován jako ekologický zdroj energie, nejedná se o nic jiného než o další formu tradičních fosilních paliv, jakými jsou například uhlí nebo ropa. Methan má dnes na svědomí globální oteplování až z 25 %⁵, což je víc než slavný oxid uhličitý. Mimo samotné spalování mnohdy dochází i k tzv. „Methane leaks“, tedy k úniku

3 SKUPINA ČEZ. Obsah methanu v zemním plynu. Online. Dostupné z: https://www.cez.cz/webpublic/file/edee/ospol/fileexport/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/zem_plyn.html. [cit. 2024-02-11] Začátek formuláře

4 ČVUT. Obsah methanu v biomethanu. Online. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89724/F2-DP-2020-Miskovsky-Jakub-Bioplynova%20stanice%20s%20upgradem%20na%20biometan.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. [cit. 2024-02-11].

5 How secretive methane leaks are driving climate change [online]. Dostupné z: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/how-secretive-methane-leaks-are-driving-climate-change>. [cit. 2024-02-13].

velkého množství zemního plynu v oblasti těžby či rozvodné sítě. Výrazná těžba by tedy byla vše, jen ne udržitelná. Další nemalou výhodou by také samozřejmě bylo snížení míry závislosti na Ruské Federaci, která je momentálně jedním z hlavních producentů zemního plynu.

3.4 Pyrolýza methanu

Jako pyrolýza je znám tepelný rozklad materiálu. Bezpochyby se jedná o nejsložitější proces celé námi předkládané soustavy, jelikož je nutné zajištění teploty, při které dochází k rozpadu methanu na čistý uhlík ve formě sazí a na námi požadovaný vodík. Tato teplota se pohybuje podle různých zdrojů mezi 1000 až 1200 °C.⁶ Možnosti, překonání tohoto problému budou detailně popsány v podkapitole možnosti ohřevu. K tomuto jevu bude docházet v pyrolytickém kotli. Plocha vnějších stěn kotle však bude dosahovat větších rozměrů, než plocha ohřivače a je tedy nutností kotel řádně odizolovat. Námi navržený postup využívá jako izolant písek a zároveň tak šikovně nabízí možnost, jak odprodávat tepelnou energii do soustavy na základě pískových akumulčních baterií, které dosahují efektivity až 95 %.⁷

3.4.1 Katalyzátory

Zahřívání methanu na takto astronomické teploty však není jediné řešení. Existují totiž i katalyzátory, které by mohly potřebnou teplotu snížit až na 700 °C⁸. Jmenovitě můžeme jako příklady uvést nikl, železo, či argon. Problémem při použití katalyzátoru by mohl však nastat u zisku čistého uhlíku. Ten při běžné pyrolýze vzniká ve formě sazí a jedná se o velmi cennou komoditu. Pokud by tedy docházelo k jeho znečištění, celý projekt by byl oslaben po ekonomické stránce. Navíc v některých případech mohou vznikat i nebezpečné sloučeniny. Například při využití železných katalyzátorů často dochází ke vzniku nežádoucích oxidů (CO_x) a při použití chloridu nikelnatého (NiCl₂) se může při jeho automatické recyklaci, ke které v kotli dochází vytvářet i chlorovodík (HCl). Uhlíkové katalyzátory sice produkují méně nebezpečné oxidy, jako oxid uhličitý (CO₂), jejichž filtrace by byla možná, nedosahují však ale tak výrazného snížení teploty.⁹ Dalším problémem by byla výstavba kolektoru, který by zachytával katalyzátor a jeho vedlejší produkty ve směsi s vodíkem, nebo ve směsi se sazemi¹⁰ a jejich následná separace. Otázka katalyzátoru tedy zůstává prozatím otevřená. Momentálně však probíhá mnoho výzkumů, studujících například kapalně katalyzátory, s účelem celý proces co nejvíce zefektivnit pro industriální využití, a proto by do budoucna nebylo rozumné tuto možnost úplně zavrhnout.

6 Teplota rozpadu methanu. Online. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.202000029>. [cit. 2024-02-11].

7 POLAR NIGHT ENERGY. Sand Battery's Efficiency Explained – Polar Night Energy's 'Sand Battery' Has Efficiency Up To 95 Per Cent. Online. Dostupné z: <https://polarnightenergy.fi/news/2022/11/24/sand-batterys-efficiency-explained-polar-night-energys-sand-battery-has-efficiency-up-to-95-per-cent>. [cit. 2024-02-16].

8 Teplota rozpadu methanu s katalyzátorem. Online. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009250922005152>. [cit. 2024-02-11].

9 MARK MCCONNACHIE, Mark, Muxina KONAROVA a Simon SMART. International Journal of Hydrogen Energy. Elsevier, 1 August 2023n. l.

10 MENYING, Liu a Huang ZEAI. SOUTHWEST PETROLEUM UNIVERSITY. Optimized Process for Melt Pyrolysis of Methane to Produce Hydrogen and Carbon Black over Ni Foam/NaCl-KCl Catalyst [online]. [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/2/360>

3.5 Skladování vodíku

Náš projekt bude dozajisté potřebovat i skladovací prostory, které umožní následný prodej produktu. Naším cílem je skladovat vodík pod tlakem 35 MPa a 70 MPa¹¹, což je tlak potřebný do současných nádrží vodíkových automobilů, nebo autobusů. Pro tento účel by nám posloužily pouhé bezešvé velkoobjemové nádrže.

3.5.1 Skladování ostatních produktů

Bioplyn není to jediné, co vzniká při anaerobní digestaci, dalším produkt tvoří digestát, účinné hnojivo, které lze, kromě jiného, využít při pěstování rostlinné složky vstupního materiálu. Tato složka je podstatná z důvodu vyrovnávání C N poměru ve fermentoru. Digestát se dá jednoduše uskladnit v objemných nádržích na dešťovou vodu. Vedlejším produktem pyrolýzy jsou saze, jež lze uskladnit např. ve výklopné nádrži na sypký materiál.

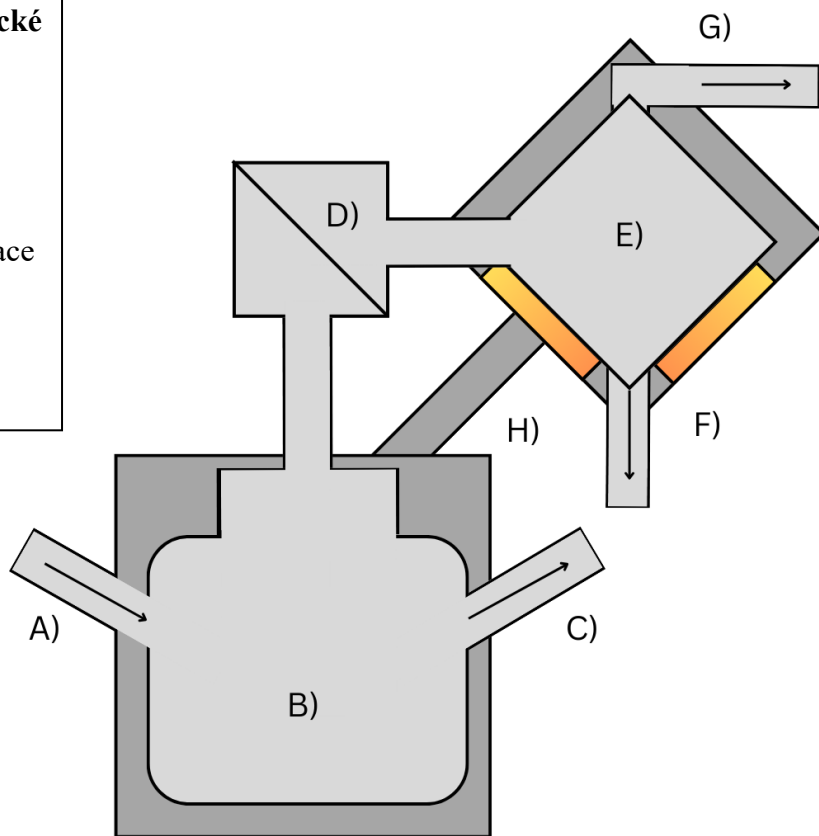
3.6 Anaerobní prostředí

Anaerobní prostředí, neboli prostředí s absencí plynného kyslíku ve formě O₂, je pro náš projekt klíčové ze dvou hlavních příčin. Tou první je sama přítomnost anaerobních bakterií, jež na vzduchu umírají a bez kterých by sama bioplynová stanice nemohla fungovat. Neopomenutelná je samozřejmě také bezpečnost provozu. Uchovávání methanu a vodíku na jednom místě s kyslíkem, kde teplota dosahuje rozmezí 700–1200 °C je poněkud riskantní, hrozí zde nebezpečí požáru, či rovnou výbuchu zařízení, kdy obě z těchto možností jsou samozřejmě nepřijatelné.

11 BÁBORSKÝ, Tomáš. VODÍKOVÉ NÁDRŽE PRO AUTOMOBILNÍ APLIKACE. Online. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=147124. [cit. 2024-02-11].

Obr. 1.2 Grafické zpracování projektu

- A) Vstup bioodpadu
- B) Fermentor
- C) Výstup digestátu
- D) Membránová separace Biomethanu
- E) Pyrolytický kotel
- F) Výstup sazí
- G) Výstup vodíku



Obrázek 2: Grafické zpracování projektu

4 Výnosnost|

Následující kapitola zabývá skutečností, jak velké množství methanu lze získat z tuny různých druhů odpadu a také množstvím následně získaného vodíku. Počítáme-li s předpokladem nepřetržitého provozu, který bude schopen spotřebovat jednu tunu odpadu, či energetické plodiny za hodinu, je náš projekt schopný za ideálních podmínek spotřebovat až 8760 tun odpadu ročně. Toto číslo se může zdát až nereálné, jelikož průměrná doba rozkladu odpadu termofilními bakteriemi se pohybuje mezi patnácti a dvaceti dny. Nesmíme však zapomenout, že se bioodpad rozkládá postupně, a od určitého objemu fermentoru (zde velmi záleží na vstupních surovinách), je schopná této produktivity bez větších problémů dosáhnout. Pomalý a vcelku rovnoměrný rozklad také pomáhá udržovat v plynulém provozu následnou biomethanovou pyrolýzu, díky možnosti snadné regulace výkonu.

4.1 Výnosy bioplynu z jednotlivých zdrojů

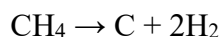
Název substrátu	sušina [%]	Org. sušina [% sušiny]	Výnos bioplynu		Obsah metanu [% objem.]
			[m³/t hmoty]	[m³/t org sušiny]	
Hospodářská hnojiva					
Kejda skotu	8 - 11	75 - 82	20 - 30	200 – 500	60
Kejda prasat	7 - 8	75- 86	20 - 35	300 - 700	60 - 70
Hnůj slepic a kuřat	32	63 - 80	70 - 90	250 - 450	60
Energetické a cíleně pěstované plodiny					
Kukuřičná siláž	20 - 35	85 - 95	170 - 200	450 - 700	50 - 55
Žitná siláž	30 - 35	92 - 98	170 - 220	550 - 680	55
Travní siláž	25 - 50	75 - 95	170 - 200	550 - 620	54 - 55
Cukrová řepa	23	90 - 95	170 - 180	800 - 860	53 - 54
Krmná řepa	12	75 - 85	75 - 100	620 - 850	53 - 54

Tabulka 1: výnosnost bioplynu podle druhu odpadu

Jak vyplývá z tabulky výše, nejideálnějším vstupním produktem jsou organické sušiny. Ty jsou zbaveny přebytečné vody a může tudíž docházet k několikanásobně efektivnějšímu rozkladu. Důležité je podotknout, že tabulka počítá s průměrnými hodnotami pro kmeny mezofilních bakterií, ne s bakteriemi termofilními, kterých by využíval náš projekt. [viz. Kapitola 1 Technologie]. Z toho vyplývá, že námi navržená technologie by poskytla až o 20 % více bioplynu, tudíž i až o 20 % více vodíku, než je udáváno našimi výpočty.

4.1.1 Výnosnost vodíku z pyrolýzy methanu

Tuto výnosnost můžeme spočítat pomocí látkového množství a molárních hmotností jednotlivých látek, jenž se vyskytují v rovnici.



Pro výpočet použijeme základní vzorec

$$n \cdot M = m$$

kde

M methanu je 16 g/mol.

M uhlíku je 12 g/mol.

M molekuly vodíku jsou 2 g/mol.

n je u methanu i uhlíku 1

n molekuly vodíku je 2

Což znamená, že do rovnice vstupuje 16 gramů methanu a vychází 12 gramů uhlíku a 4 gramy vodíku.

4.1.2 Modelový příklad jedna

Jako vstupní produkt použijeme kejdu skotu, konkrétně její sušinu. Protože Kejda skotu obsahuje na tunu přibližně 10 % organického materiálu, tak ze sušení 10 tun získáme přibližně 1 tunu sušiny. Z té je možné vyprodukovat 200–500 m³ bioplynu s 60% obsahem methanu. Finální množství získaného methanu tedy činí asi 120–300 m³. Víme, že z 16 g methanu vzniknou 4 g vodíku, což znamená, že z 120 m³ (tj. 78 840 g) vznikne 19 710 g vodíku a z 300 m³ vznikne vodíku 49 275 g. To znamená, že vyrobíme množství vodíku v rozmezí 19,7 – 49,3 kg a zisk sazí by dělal 59,1 – 147, 8 kg.

4.1.3 Modelový příklad dvě

Zde se jedná o obdobný proces, vstupní produkt však netvoří kejda skotu, nýbrž travina **ozdobnice čínská** (*Miscanthus sinensis*). Tato rostlina je kromě kukuřice jednou z mála C4 rostlin schopných přežít v mírném pásu. Jako C4 jsou označovány rostliny s fotosyntézou rozšířenou o tzv. Hatchův–Slackův cyklus, díky kterému velmi rychle a účinně přeměňují vodu, živiny a oxid uhličitý na organický materiál, což z nich činí ideální kandidáty pro energetický průmysl. Jedním z vedlejších produktů stanice je také digestát, vynikající hnojivo, jež by mohlo být použito pro pěstování ozdobnice, pro dosažení vyváženějšího C/N poměru ve fermentoru. Zisk bioplynu z tohoto vstupního materiálu je dokonce ještě vyšší než u kejdy, procentuální zastoupení methanu bohužel dosahuje nižších hodnot. Na organickou sušinu travin bychom potřebovali něco mezi 2 až 4 tunami¹² čerstvých travin. Tudíž z tuny travní sušiny jsme schopni získat 550–620 m³ bioplynu. Tj. 297–334,8 m³ methanu (pro zjednodušení počítáme jen s 54 % výnosem biomethanu). V důsledku by zisk vodíku činil 48,7 – 54,9 kg a sazí 146,3 – 165 kg.

4.2 Účinnost

Pro náš projekt je těžké určit celkovou výnosnost, ale pokud se zabýváme pouze objemem vodíku, který je možné z 1 tuny odpadu získat, bude účinnost následovná.

Účinnost vysoušení de-facto stoprocentní. Sice se z deseti tun odpadu udělá pouze jedna tuna sušiny, nicméně se jedná o pouhé odstranění vody, což nesnižuje podíl vytěžitelného vodíku. Ztráta biologického materiálu je tedy nulová.

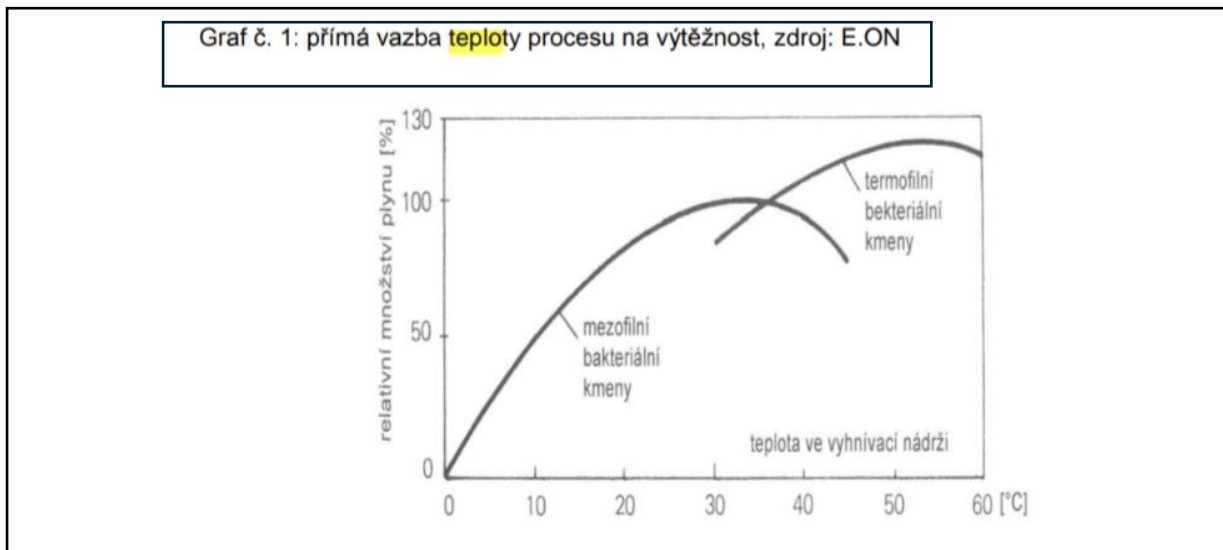
Co se týče účinnosti anaerobní digesce, máme výhodu nad normálními bioplynovými stanicemi v ohledu využití odpadního tepla k rekuperaci (viz. kapitola rekuperace). Z následujícího grafu můžeme vyčíst, že při ideální teplotě může být účinnost až 120 %.

Obsah methanové složky v bioplynu je 60 %, (liší se v závislosti na vstupním materiálu) membránovou separací tedy dosáhneme právě takové účinnosti.

Pyrolýza operuje s účinností okolo 90 %.

12 [Tráva na suchou tunu]. Online. In: ChatGPT. GPT-3.5 version. Dostupné z: OpenAI, <https://chat.openai.com/c/04cdab00-f2f1-4d80-a08b-379efcae5d61>. [cit. 2023-02-11].

Vynásobením všech hodnot dostaneme souhrnnou účinnost 65 %, což je výhodnější než elektrolýza vody, která má účinnost 55 % - 60 %.

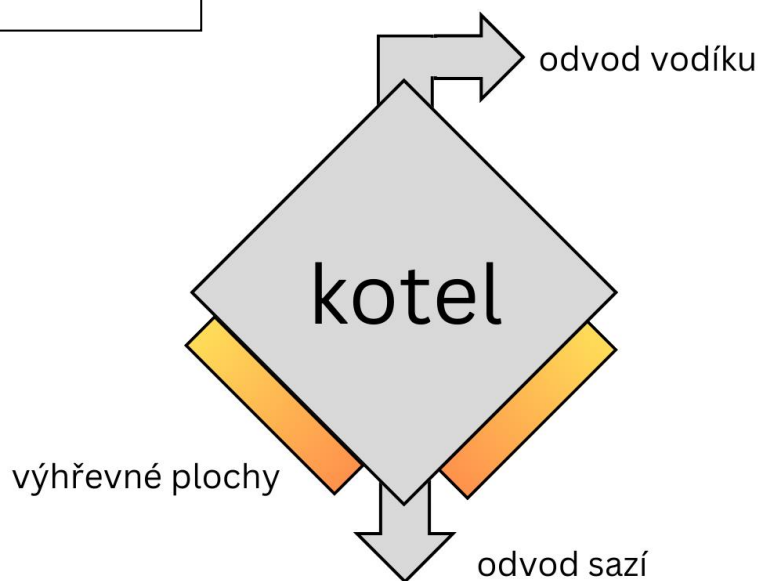


Obrázek 3: Graf teploty procesu výtěžnosti

4.3 Velikost pyrolytického kotle

Za předpokladu udržování nepřetržitého provozu v naší bioplynové stanici při spotřebě tuny odpadu za hodinu bude vzhledem k objemu methanu potřebný pyrolytický kotel o minimální velikosti 300 m³. Náš návrh je kotel ve tvaru krychle o hraně 7 metrů, s orientací dle obrázku (Obr 2.1). Každé z topenišť je tvaru čtyřhranu o ploše podstavy 24,5 m² a výšce 0,5 metru.

Obr.2.1: Schéma pyrolytického kotle



Obrázek 4: Schéma pyrolytického kotle

5 Spotřeba

Následující kapitola se bude věnovat převážně možnostmi ohřevu, ale i spotřebu stlačovacího aparátu, jež bude stlačovat vodík na požadovaný tlak.

5.1 Výpočet spotřeby tepla

Následující výpočty budou vycházet převážně ze vztahu:

$$Q = m * C * \Delta T$$

kde:

Q je teplo

m je hmotnost látky ohřívané

c je měrná tepelná kapacita látky

ΔT je rozdíl termodynamických teplot.

Vždy budeme ohřívat určité množství methanu (pro zjednodušení uvádíme příklad z kapitoly 2.1.2, a to modelový příklad jedna, konkrétně jeho nejvyšší možný výnos). Na zahřátí 300 m³

methanu na námi požadovanou teplotu (1100 °C) je třeba dodání energie o velikosti 451 073 205 J. Měrná tepelná kapacita methanu je 2190 J/kg*K a rozdíl teplot 1045 K, jelikož vstupní plyn je již předeřhřátý na 55 °C. Hmotnost odpovídá 300 m³ krát hustota methanu 0,657 kg/m³, tedy 197,1 kg. Výsledná hodnota tedy odpovídá 125,3 kWh. Při procesu však bude neodvratně docházet k tepelným ztrátám při předávání tepla skrz ocel. Hodnoty této ztrátové energie lze dosáhnout využitím následujícího vzorce:

$$Q_z = S * U * \Delta T$$

Kde:

S je plocha ztrátové oblasti, tj. obě topeniště

U je tepelný průchod izolačního materiálu

ΔT je rozdíl vnější a vnitřní teploty.

Docházelo by tedy ke ztrátám přibližně 2,12 kWh. Z toho vyplývá, že celková hodinová spotřeba ohřevu by činila 127,42 kWh.

5.1.1 Výpočet spotřeby tepla při použití katalyzátoru

Jak již bylo zmíněno v podkapitole katalyzátory, při jejich použití není zapotřebí dosáhnout teploty 1100 °C, jelikož jsou schopny spouštět pyrolýzu už za teplot tak nízkých, jako 700 °C. Výrazně se tedy sníží rozdíl termodynamických teplot a následná hodinová spotřeba by tedy činila jen 77,34 kWh + 1,31 kWh na tepelných ztrátách. Dohromady tedy 78,65 kWh, což znamená úsporu 48,77 kWh, tedy více než třetinovou.

5.2 Možnosti ohřevu

Jednotlivé pyrolytické kotle se výrazně liší způsoby ohřevu, což se poté výrazně projevuje i v jejich spotřebě. V následující části textu se tedy zaměříme na různé varianty ohřevu a jejich praktické využití.

5.2.1 Koks

První možností, jež se vyloženě nabízí, je koks, a to díky své vysoké výhřevnosti a také hutnickému průmyslu s nímž je neodmyslitelně spojen. Výhřevnost koksu je 7,6 kWh na kilogram¹³. To znamená, že jeho hodinová spotřeba by se pohybovala okolo 16,77 kg, nebo 10,18 kg při použití katalyzátoru. Koks má však jednu nezanedbatelnou nevýhodu, při jeho spalování dochází k uvolňování nemalého množství CO₂, v našem případě tedy konkrétně 61,5 kg za hodinu a při použití katalyzátoru 37,33 kg.

5.2.2 Žhavení vodiče

Další možnost zahřívání, která je mnohem přívětivější po ekologické stránce, je měděná spirála. V našem případě však použití mědi nepřipadá v úvahu, jelikož má příliš nízkou teplotu tání, mohli bychom ji však substituovat jiným kovem, konkrétně wolframem. Dochází zde ale

¹³ Výhřevnost koksu. Online. Dostupné z: <https://www.opop.cz/vyhrevnost-paliv>. [cit. 2024-02-11].

k problému při nabíjení systému, jelikož při uvažování o 100 kg topném tělese, tak jen na jeho prvotní zahřání dojde ke spotřebě 4,02 kWh, a to za předpokladu stoprocentní efektivity přenosu energie, přičemž ta se pohybuje kolem 90 %¹⁴. Z toho vyplývá, že by finální spotřeba činila 4,422 kWh energie. Pravděpodobně by se sice snížily tepelné ztráty z důvodu menší ohřevné plochy, ale spotřeba elektrické energie na tunu odpadu by vzrostla o 10 %, tedy na 140,2 kWh.

5.2.3 Část bioplynu využít jako zdroj paliva.

Ani z ekologického hlediska to dobrý nápad není i z hlediska výnosnosti by tento nápad výrazně omezil výnosy, a proto si myslíme, že to není úplný ideál. Výhřevnost bioplynu je 18–26 MJ na m³.

5.2.4 Další možnosti

Dalšími možnostmi by mohla být nafta, či zemní plyn. Fosilní paliva jsou však to, co se náš projekt snaží nahradit, a jejich využívání tedy nedává prázdný smysl. Výhřevnost nafty je 42,61 MJ na kg a zemního plynu 33,48 MJ na m³, tím pádem bychom potřebovali 10,77 kg nafty, nebo 13,71 m³ zemního plynu. Při použití katalyzátoru 6,65 kg nafty, či 8,46 m³ zemního plynu. U nafty emise CO₂ činí 33,85 kg¹⁵ a u zemního plynu 27,42 kg.¹⁶ Při užití katalyzátoru by tyto hodnoty byly 20,9 kg u nafty a 16,92 kg u zemního plynu. Což jsou ale ve finále nižší emise než při spalování koksu.

5.3 Kompenzace v podobě výstavby vlastní solární farmy

Spotřeby tohoto kolosu by se dala korigovat pomocí solární farmy. 14 solárních panelů může za rok vyrobit až 3000 kWh, tedy 8,21 kWh denně. Na základě předchozích výpočtů můžeme říct, že spotřeba celého projektu by se pohybovala okolo 24*127,42 kWh. To je 3058,08 kWh denně. Na pokrytí celkové spotřeby by tedy bylo potřeba 373*14 panelů. Při použití katalyzátoru by se jejich počet snížil na 230*14 panelů. Ovšem tento předpoklad je pro panely starší o výkonu 250 W a dnes jsou k dispozici již modernější typy o výkonu 450 W. Tudiž místo 14 bychom potřebovali jen 7,8 panelu. Ovšem i s touto inovací je zřejmé, že solární panely by nebyly schopné pokrýt celou energetickou spotřebu, nýbrž jí jen korigovat.

5.4 Výpočet spotřeby na stlačování

Energii potřebnou na stlačování vodíku vypočítáme pomocí Boylova–Mariottova zákona

$$W = -Q = -nRT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

a Boyleova zákona

¹⁴ BÖHM, Pavel. ŽHAVENÍ VLÁKNA ŽÁROVKY. Online. Dostupné z: https://www.vernier.cz/experimenty/bohm/zhaveni_vlakna_zarovky.pdf. [cit. 2024-02-16].

¹⁵ Výpočet emisí CO₂. Online. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/vypocet-emisi-co2/>. [cit. 2024-02-16].

¹⁶ Lze přepočíst kilowatthodiny na kilogramy CO₂? Online. Dostupné z: <https://www.veronica.cz/otazky?i=275>. [cit. 2024-02-16].

$$p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

Kdy stlačujeme vodík o hmotnosti 55 kg a atmosférickém tlaku, tj. 101325 Pa, na tlak 35 MPa a to v nejhorším možném scénáři pro energetické náklady. Objem po stlačení bude 0,01417 m³, kdy potřebná práce činí 69 734 J, což je 0,01 kWh. Látkové množství se dá v tomto případě vypočíst ze vztahu

$$n = m/M$$

kde $M = 2$

Tato energie by byla zapotřebí, kdyby ke kompresi docházelo v průběhu celé hodiny, což je však při naší vysoké produkci nedostačující a bylo by zapotřebí pořízení dvou podobných kompresorů. Jak jejich pořizovací cena, tak náklady na údržbu jsou ale příliš drahé. Abychom děj tedy urychlili na 1 minutu potřebujeme 60krát více energie neboli 0,6 kWh. Účinnost kompresorů se pohybuje v rozmezí 50–60 %¹⁷, to znamená dvojnásobnou spotřebu neboli 1,2 kWh.

6 Ekonomická návratnost

V této kapitole se pokusíme prokázat, že náš projekt má potenciál být vysoce výnosným, jak v porovnání s bioplynovými stanicemi, tak v kontrastu s jinými zdroji vodíku. Pro porovnání jednotlivých metod jako metriku použijeme dobu návratnosti. Pro kurz dolaru ke koruně použijeme 23 Kč/USD. Pro výpočet návratnosti použijeme vzorec pro vyjádření tzv. prosté doby návratnosti.¹⁸

$$TN_P = \frac{IN}{CF}$$

kde:

IN náklady na investici (investiční výdaj),

CF je roční peněžní tok (roční příjem).

Jak můžeme vidět, budeme potřebovat znát výši vstupní investice a čistý roční příjem. Tyto hodnoty si rozebereme v následujících kapitolách.

6.1 Investiční náklady

Investičními náklady jsou myšleny peníze vynaložené na výstavbu celého aparátu, tedy bioplynové stanice, náklady na spoje, vedení, izolaci, pyrolytické pece a nádrž na skladování produktů.

¹⁷ Jaké parametry se udávají u kompresorů? Online. Dostupné z: <https://www.airconsult.cz/clanky/blog/jake-parametry-se-udavaji-u-kompresoru>. [cit. 2024-02-16].

¹⁸ Výpočet návratnosti. Online. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/cvekonomika/5_teorie.html. [cit. 2024-02-16].

Otázka ceny výstavby samotné bioplynové stanice je přímočará. Jedná se totiž o zavedení procesu, o kterém již existuje mnoho pojednání. V našich výpočtech vycházíme ze tří různých zdrojů, jejichž uvedené hodnoty jsme zprůměrovali.^{19 20 21} Částka, se kterou budeme počítat je 190 milionů Kč. V ní je obsažena jak lidská práce, tak celý aparát pro produkci bioplynu, jeho transformaci na biomethan, tedy i membránová separace, a následné odvedení do pyrolytické pece.

Částka potenciálně vynaložená na pyrolytickou pec je poměrně problematická. Pyrolýza methanu dosud nedoznala dostatečného rozšíření k tomu, aby se zařízení na její provedení prodávaly ve větším množství. Ač se tyto pece dají koupit, většinou je třeba konstrukce na míru, a tedy jejich cena není k nalezení. Můžeme tedy vycházet z ceny pyrolytických kotlů na biologický materiál, která se ve své podstatě od svých protějšků na plyn příliš neliší. Budeme proto počítat s částkou 700,000 dolarů, což je asi 16 milionů Kč.²²

Předposledním článkem v procesu výroby stlačeného vodíku je pochopitelně kompresor. Ceny takovýchto kompresorů jsou poměrně jednoduše k dohledání. My budeme počítat s hodnotou £120,000, což je přibližně 3,6 milionu Kč²³.

Další z nákladů je vynaložen na uskladnění vzniklého vodíku. Skladování vodíku je velmi malicherné a také nákladné, a proto se mu musí snažit předejít. I přesto je ale nutné mít alespoň minimální skladovací kapacitu. Za minimum lze považovat kapacitu na týden produkce bez odbytu, přičemž tato situace by neměla nastat, jelikož vodík je velmi žhavé zboží. Při denní produkci 0,4 m³ vodíku stlačených na 350 barů, tedy 2800 litrů týdně, nám bude postačovat kapacita 17 tlakových nádob o objemu 165 litrů každá. Z důvodu odchylky budeme počítat s 20 kusy, což v celku činí těsně pod milion Kč²⁴.

Pochopitelně chápeme, že nejsme schopni odhadnout cenu celého projektu naprosto přesně. Abychom však dokázali, že má potenciál být výdělečný i přes zvýšené náklady, započítáme do cen i odchylku 10 %. Celkové náklady na stavbu zařízení tedy vychází na přibližně 227 milionů korun.

Název zařízení	Cena v USD	Cena v Kč
Bioplynová stanice	\$8,104,000	186 400 000 Kč

¹⁹ Náklady na výstavbu bioplynové stanice 1 [online]. [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: <https://finmodelslab.com/blogs/startup-costs/biogas-plant-operations-startup-costs>

²⁰ Náklady na výstavbu bioplynové stanice 2. Online. Dostupné z: https://energypedia.info/wiki/Costs_of_a_Biogas_Plant#Capital_Costs. [cit. 2024-02-16].

²¹ Náklady na výstavbu bioplynové stanice 3. Online. Dostupné z: <https://birchsolutions.co.uk/how-much-does-it-cost-to-build-a-biogas-plant/>. [cit. 2024-02-16].

²² Cena pece. Online. Dostupné z: <https://acmefurnace.en.made-in-china.com/product/WQPURskYTtRG/China-Acme-China-Vacuum-Pyrolysis-Furnace-Acme-Industrial-Furnace.html>. [cit. 2024-02-17].

²³ Pure H₂ Hydrogen Compressors. Online. Dostupné z: <https://pureenergycentre.com/hydrogen-products-pure-energy-centre/hydrogen-compressor/>. [cit. 2024-03-11].

²⁴ Tlaková lahev na vodík. Online. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/70Mpa-Hydrogen-Type-4-Tank-Hydrogen_1600875672661.html?s=p. [cit. 2024-02-17].

Pyrolytický kotel	\$700,000	16 000 000 Kč
Kompresor na vodík	\$157 000	3 600 000 Kč
20x tlakové nádrže na vodík	\$40,000	920 000 Kč
Odchylka 10 %	\$900,100	20,692,000 Kč
Součet	\$9,901,100	227 612 000 Kč

6.2 Zisk

Zisk je rozdíl mezi výnosy a náklady, tedy mezi tím, co jste získali např. prodejem zboží a tím, co jste do výroby museli vložit²⁵. Z této definice vyplývá, že dále budeme muset vyčíslit předpokládaný příjem z prodeje produktů a výrobní a provozní náklady.

6.2.1 Výnosy

Jelikož roční provozní doba bioplynové stanice se pohybuje kolem 8 000 hodin²⁶, budeme při výpočtech používat tuto hodnotu. Hlavním příjmem je pro nás pochopitelně prodej vodíku. Průměrný předpokládaný výnos činí 43,2 kg vodíku na hodinu [viz. Kapitola výnosnost], což znamená, že jsme za 8 000 hodin schopni vyprodukovat až 345 254 kg vodíku. Jako referenční prodejní cenu vodíku použijeme současnou cenu veřejné plničky v Praze na Barrandově, sníženou o hrubě nadsazenou marži v hodnotě 25 %, i přesto, že marže na stávajících pohonných hmotách činí okolo 5 %.²⁷ Tato cena s odečtenou marží činí 400 Kč na kilogram.²⁸ Tato cenovka koresponduje taktéž se současnou cenou vodíku v sousedním Německu, která je vyšší, než 15 €/kg.²⁹ Vzhledem k tomu, že vodík je má velmi malou molekulu a špatně se s ním manipuluje, zahrneme do našich výpočtů i 10% ztrátu při manipulaci a skladování. Jednoduchým vynásobením těchto hodnot dostáváme roční příjem 117,991,440 Kč pouze z prodeje vodíku.

Další položkou v kategorii příjmů je prodej sazí. Ač se může zdát, že saze jsou produkt čistě odpadní, opak je pravdou. Čisté saze vysoké kvality, které budou vznikat pyrolýzou methanu jsou velmi žádanou komoditou na výrobu pneumatik, či jako vstupní materiál chemického průmyslu. Cena za 1 tunu kvalitních sazí se pohybuje okolo 1000\$.³⁰ Průměrný předpokládaný

²⁵]Definice zisku. Online. Dostupné z: <https://www.kb.cz/cs/podpora/slovník/vyrazy-zacinajici-na-z/zisk#:~:text=Zisk%20je%20rozd%C3%ADl%20mezi%20v%C3%BDnosy,jedn%C3%ADm%20ze%20z%C3%A1kladn%C3%ADch%20kamen%C5%AF%20kapitalismu..> [cit. 2024-02-17].

²⁶ Abdullah Akbulut, Oğuz Arslan, Halit Arat, Oğuzhan Erbaş, Important aspects for the planning of biogas energy plants: Malatya case study, Case Studies in Thermal Engineering

²⁷ Marže pohonných hmot. Online. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/phm-marze/>. [cit. 2024-02-18].

²⁸ Cena vodíku. Online. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/auto/skokove-zdrazeni-vodik-v-cesku-provoz-plnicich-stanic-je-pr/r~ff2e8dfaaef511ee8b4e0cc47ab5f122/>. [cit. 2024-02-18].

²⁹ Cena vodíku v Německu. Online. Dostupné z: <https://www.glpautogas.info/en/hydrogen-sale-price-germany.html>. [cit. 2024-02-18].

³⁰ Cena sazí. Online. Dostupné z: <https://www.procurementresource.com/resource-center/carbon-black-price-trends>. [cit. 2024-02-18].

výnos sazí činí 130 kg za hodinu [viz. Kapitola výnosnost]. Za takové množství bychom mohli inkasovat až 24 milionů korun ročně.

Dalším vznikajícím produktem je digestát. S ním ovšem nepočítáme jako se zbožím. Nemáme v plánu ho prodávat, ale spíše jej využijeme na podporu vlastní zemědělské produkce, sloužící například pro zvýšení kvality směsi rozkládané ve fermentoru.

Příjem	Cena v USD	Cena v Kč
Prodej vodíku	\$6,000,000	138,101,600 Kč
Prodej sazí	\$1,040,000	23,920,000 Kč
Celkem	\$7,040,000	162,021,600 Kč

6.2.2 Provozní náklady

Provozní náklady se skládají z nákladů na energie a údržbu, a také na lidskou práci.

První potenciální náklad je vstupní materiál v podobě biologického odpadu. Zde se počítá s minimálními náklady, jelikož v ČR je situace taková, že se většinou se za odvoz tohoto odpadu platí. My bychom byli schopni poskytnout tuto službu zdarma.

Co se týče obsluhy a údržby bioplynové stanice, podle různých zdrojů se roční náklady pohybují mezi \$200,000 až \$500,000.^{31 32} Do karet nám nahrává, že většina procesu nepotřebuje přímý lidský zásah, a proto budou náklady na platy nižší. Použijeme vyšší udanou hodnotu a budeme předpokládat, že částka postačí i na údržbu pyrolytického kotle.

Jelikož se náš projekt snaží být emisně neutrální, je pochopitelné, že v celém procesu nebudeme využívat fosilní paliva. To umocňuje vysokou spotřebu elektrické energie, která v současném energetickém mixu ČR není zcela obnovitelná, nicméně snad z dlouhodobého horizontu bude. Spotřeba by se dále dala vynahrazovat vlastní sluneční farmou [viz. Kapitola spotřeba].

V součtu spotřebujeme 1 238 MWh ročně na ohřátí methanu wolframovou cívkou a stlačení vodíku na potřebný tlak (hodnoty získány z kapitoly Spotřeba, ke které byla připočtena

³¹ Údržba bioplynové stanice. Online. In: Bing.com. GPT-4 version. Dostupné z: bing.com, [Copilot s GPT-4 \(bing.com\)](#) [cit. 2023-02-11].

³² Abdullah Akbulut, Oğuz Arslan, Halit Arat, Oğuzhan Erbaş, Important aspects for the planning of biogas energy plants: Malatya case study, Case Studies in Thermal Engineering

energetická ztrátovost 10 % při kompresi). Se současnou cenou 1 Kwh za 6 Kč³³ nás roční účet za elektřinu vyjde na necelých 750 tisíc Kč.

Z důvodu nepřesností pochopitelně do výpočtu zahrneme i 10 % odchylku.

Výdaj	Cena v USD	Cena v Kč
Údržba a provozní výdaje	\$500,000	11,500,000 Kč
Energie	\$29,800	685,000 Kč
Odchylka 10 %	\$53,000	1,220,000 Kč
Součet	\$583,000	13,400,000 Kč

Když máme vyjádřeny veškeré peněžní toky, můžeme se vrátit k původnímu vzorci. Investiční náklady byly vyjádřeny na 227 612 000 Kč, roční úspora, tedy příjmy očištěné o náklady jsou 148,621,600 Kč. Po dosazení do vzorce nám vyjde prostá návratnost 1.53 roku což je výrazně méně než návratnost normální bioplynové stanice, která se pohybuje v rozmezí 5-7 let.³⁴

Abychom mohli náš projekt zhodnotit z různých úhlů pohledu, použili jsme internetový nástroj,³⁵ který je schopen vypočítat složenou dobu návratnosti v případě, že by byl financován

VÝSLEDKY	
NPV - čistá současná hodnota projektu:	1065474608 Kč ???
Roční ekvivalentní finanční toky investice:	104392164 Kč ???
Doba návratnosti:	2 let ???
Diskontovaná doba návratnosti:	2 let ???
IRR - vnitřní výnosové procento investice:	56 % ???

Tabulka 2: Výsledky

³³ Potvrzeno. Regulovaná část ceny elektřiny lidem od ledna zdraží o tisíce ročně. Online. Dostupné z: <https://novinky.cz/clanek/ekonomika-potvrzeno-regulovana-cast-ceny-elektriny-lidem-od-ledna-zdrazi-o-tisice-rocne-40452521>. [cit. 2024-02-18].

³⁴ Příklad realizace projektu: Zemědělská bioplynová stanice Dražobudice. Online. Dostupné z: <https://www.bioplynovestanice.cz/cleneni-bps/>. [cit. 2024-02-24].

³⁵ Finanční kalkulačtor pro hodnocení ekonomické efektivnosti investic. Online. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/110-financni-kalkulator-pro-hodnoceni-ekonomicke-efektivnosti-investic>. [cit. 2024-02-24]

půjčkou s úrokovou sazbou ve výši 5 %, a porovnat projekt s výnosem alternativní investice, v našem případě současnou diskontovanou sazbou ve výši 5,25 %.³⁶ Výsledek kalkulace je uveden v následujícím obrázku.

Doba návratnosti je i přes plné financování z půjčených peněz stále 2 roky, což je v porovnání s bioplynovými stanicemi stále velice dobré. Jelikož životnost bioplynové stanice je uvedena na 15 let, zbylých 13 let budou všechny zisky čistým příjmem.

7 Porovnání s ostatními možnostmi výroby vodíku

Předchozí kapitola porovnávala ekonomičnost projektu převážně s konvenční bioplynovou stanicí. Nicméně si ale musíme uvědomit, že náš projekt převážně spadá do oblasti výroby vodíku, a proto musíme naši konkurenceschopnost porovnat i s tímto sektorem. Pro takové mezi technologické srovnání je možno použít několik parametrů. Jednou z nich je právě doba návratnosti, mezi další patří například určit náklady na výrobu kilogramu vodíku. Srovnání dle doby návratnosti je však velmi komplikované, jelikož pro většinu metod neexistují vhodná data.

7.1 Srovnání s elektrolýzou

Jak bylo výše zmíněno, tuto metodu návratnosti nelze široce použít. Jelikož nemáme přístup ke specifickým datům, dovolíme si tedy srovnat námi předkládaný projekt s prvním komerčním elektrolyzérem v Napajedlech. Zde můžeme srovnat roční výrobu vodíku, kde náš projekt mnohonásobně převyšuje nejběžněji prosazovanou metodu elektrolýzy. Jak jsme výše uváděli, naše metoda může za hodinu vyrobit 43,2 kg vodíku, zatímco elektrolyzér v Napajedlech má výnos pouze 82 kg na den.³⁷ Jedná se tedy o propastný rozdíl.

Abychom mohli porovnávat parametr cena na kilogram, musíme jej první určit u našeho projektu. Budeme počítat s ročním výnosem 345 254 kg a ročními náklady 13,400,000 Kč. Jednoduchým vydělením těchto čísel dostaneme hodnotu 38.81Kč/kg neboli 1.69\$/kg. U elektrolýzy se tento parametr pohybuje v rozmezí 3 – 7,5 \$/kg, což je hodnota taktéž výrazně vyšší.

7.2 Srovnání s neekologickými způsoby výroby

Až 96 % veškerého vyrobeného vodíku v současnosti pochází z fosilních paliv³⁸. Je to dáno právě tím, že se jedná o levnější a technologicky méně náročnější projekt. Hlavními způsoby jsou parní reforming zemního plynu a zplyňování uhlí. Jak bylo řečeno výše, parametry těchto technik jsou nedostupné, a proto se musíme spokojit s údajem ceny na kg. U parního reformingu zemního plynu se tato hodnota pohybuje v rozmezí 1-3,5 \$/kg a u zplyňování uhlí mezi 1,2 – 2,2 \$/kg³⁸. Tyto hodnoty už jsou ve svých krajních bodech levnější než naše metoda, nicméně je si třeba uvědomit, že tyto metody produkují značné množství skleníkových plynů. Z toho důvodu se dá očekávat, že v prostředí, jako je EU, budou brzy omezeny či minimálně dojde k jejich znevýhodnění.

³⁶ ČNB. Jak se vyvíjela diskontní sazba ČNB? Online. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/casto-kladene-dotazy/Jak-se-vyvijela-diskontni-sazba-CNB/>. [cit. 2024-02-24].

³⁷ SOLAR GLOBAL. SG Hydrogen Napajedla. Online. Dostupné z: <https://www.solarglobal.cz/vodik>. [cit. 2024-02-25].

³⁸ ČESKÁ VODÍKOVÁ TECHNOLOGICKÁ PLATFORMA Z.S. Základní informace k vodíku. Online. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>. [cit. 2024-02-25].

8 Odbyt produktu

Je jasné, že při produkci určitého produktu je žádoucí stálý odbyt. Čím stabilnější takový odbyt je, tím lépe, jelikož se snižuje riziko poklesu zájmu o produkt, který by se následně negativně projevil na jeho ceně. Pro náš projekt by tedy byl ideální zákazník stát, či státní firma, jelikož zde odpadá možnost zkrachování této instituce. Vyloženě vhodné by byly České Dráhy, které potřebují naplňovat závazky v podobě ekologických předpisů jako fit for 55.

8.1 Výhodnost vodíkových vlaků

Nejnovější vodíkový vlak je Coradia iLint od firmy Alstom. Jedna souprava vychází na 452 milionů³⁹ Kč, to je sice dražší než pořizovací cena vlaku naftového, ale následné náklady na údržbu mohou být až o 25 % nižší. Vodíkový vlak spotřebovává v průměru 20 kg vodíku na 100 km.⁴⁰ Standardní naftový vlak spotřebovává na stejnou vzdálenost přibližně 300 litrů nafty. To znamená, že náklady na provoz těchto dvou vlaků jsou téměř shodné. Vodíková souprava obsahuje až 160 míst na sezení, což je srovnatelné se 3 vozy u jeho naftové obdoby. Všeobecně by se tedy dalo říct, že naftový a vodíkový vlak jsou srovnatelnými oponenty. Značnou výhodou vodíkové soupravy je však její bezemisnost a tedy možnost použití i po roce 2055. A navíc, jen tak pro zajímavost, dokáže jet rychlostí až 500 kilometrů za hodinu.

8.2 Využití vlaků

A kde by takovéto vlaky mohly jezdit? Na tuto otázku nám poskytla odpověď samotná Správa železnic, která již v této oblasti provedla studii proveditelnosti. Z jejích výsledků jasně vyplývá, že v České republice by se vodíkové vlaky vyplatily převážně na trati Ostrava – Bruntál – Olomouc.⁴¹ Tato trať má délku 144 km s běžnou frekvencí šest vlaků za den v jednom směru tj. 12 za den. Celkem tedy souprava ujede 1728 km kdy spotřeba by se pohybovala okolo 345,6 kg vodíku. K této spotřebě by se daly připočítat i spoje, které jedou jen do Krnova, jenž se na této trati nachází.

³⁹ Vodíkové vlaky na kolejích. Online. JANKŮ, Josef. Emovio. 2021. Dostupné z: <https://emovio.cz/2021/03/30/vodikove-vlak-y-na-kolejich/>. [cit. 2024-02-25].

⁴⁰ Českem poprvé projel vlak poháněný vodíkovým palivovým článkem. Je to předzvěst budoucnosti? Online. Energiebezemisi. 2022. Dostupné z: <https://energiebezemisi.cz/novinky-v-oboru/podcast-vodikove-vlak-y/>. [cit. 2024-02-25].

⁴¹ Vodík se na českých kolejích nevyplatí. S výjimkou jediné trati. Online. Idnes. 2023. Dostupné z: https://www.idnes.cz/ekonomika/doprava/zeleznice-vlak-y-alternativni-paliva-vodik-krnov.A230606_155740_eko-doprava_cfr. [cit. 2024-02-25].

9 Realizovatelnost

Obsah této práce byl prozatím velmi teoretický, zakládající se převážně na výpočtech. Je zde tedy vůbec možnost jeho realizace v praxi? My samozřejmě nejsme žádní odborníci, kteří by na tuto otázku dokázali s jistotou odpovědět. Jsou zde ale mnohem kvalifikovanější osoby, které náš projekt zaujal. Možnost potenciální realizace by tedy neměla být zavrhována. Vloni na podzim jsme se zúčastnili finálového kola energetické olympiády, kde se náš projekt neobešel bez povšimnutí. Umístili jsme se na stupních vítězů, a navíc ještě zaujali odborníky z Ministerstva průmyslu a obchodu, jenž si nás pozvali na oficiální schůzi. Ta proběhla v únoru přímo v budově ministerstva, kde jsme náš projekt podrobněji představili. Jmenovitě se dostavili například pan náměstek ministra a vrchní ředitel sekce energetiky a jaderných zdrojů Ing. et Ing. René Neděla, či ředitel odboru strategie a mezinárodní spolupráce v energetice Ing. Antonín Beran. Ač byli pánové zpočátku mírně skeptičtí, podařilo se nám náš projekt obhájit. A v případě potřeby se můžeme na výše jmenované kdykoli obrátit.



Obrázek 5: Energetická olympiáda

10 Závěr

Cílem naší práce byl návrh alternativního způsobu výroby vodíku, a to konkrétně pyrolýzou biomethanu. Celý projekt funguje na principu propojení bioplynové stanice se zařízením na pyrolýzu methanu. Výstupními produkty procesu jsou vodík a saze, a jeho uhlíková stopa je tedy výrazně nižší než u běžné bioplynové stanice, kde dochází k následnému spalování bioplynu na oxid uhličitý. Naše výpočty potvrdily, že by tento projekt převyšoval klasickou bioplynovou stanici nejen v udržitelnosti, ale také výnosnosti, jelikož již sama doba návratnosti se pohybuje v třetinových hodnotách. Z hlediska výroby vodíku je náš projekt navíc schopný cenově konkurovat i výrazně méně ekologickým variantám.

Všechno ale nemůže být čistě růžové, a tak má i náš projekt menší háčky, a to především v oblasti pyrolýzy biomethanu. Ta prozatím není ve fázi, kdy by se dala efektivně využívat při průmyslové výrobě. Momentálně však na jejím zefektivnění pracují různé výzkumné skupiny a nebude tedy snad trvat dlouho, než bude proveditelná v takovém rozsahu, jaký je zapotřebí u našeho projektu. Klíčová by byla také lokalita projektu, která by umožnila efektivní příjem vstupního materiálu a zároveň stálý odbyt vzniklých produktů.

11 Použitá literatura

1. ¹https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/5_1_CH4_Solid_Waste.pdf
2. ¹ PŘÍDAL, Štěpán. PŘÍPADOVÁ STUDIE – BIOPLYNOVÁ STANICE V ÚPICI. Online. Dostupné z: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/30253/DPTX_2009_1_0_199565_0_81762.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [cit. 2024-02-11].
3. ¹ SKUPINA ČEZ. Obsah metanu v zemním plynu. Online. Dostupné z: https://www.cez.cz/webpublic/file/edee/ospol/fileexport/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/zem_plyn.html. [cit. 2024-02-11] Začátek formuláře
4. ¹ ČVUT. Obsah metanu v biometanu. Online. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89724/F2-DP-2020-Miskovsky-Jakub-Bioplynova%20stanice%20s%20upgradem%20na%20biometan.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. [cit. 2024-02-11].
5. ¹ How secretive methane leaks are driving climate change [online]. Dostupné z: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/how-secretive-methane-leaks-are-driving-climate-change>. [cit. 2024-02-13].
6. ¹ Teplota rozpadu metanu. Online. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.202000029>. [cit. 2024-02-11].
7. ¹ POLAR NIGHT ENERGY. Sand Battery's Efficiency Explained – Polar Night Energy's 'Sand Battery' Has Efficiency Up To 95 Per Cent. Online. Dostupné z: <https://polarnightenergy.fi/news/2022/11/24/sand-batterys-efficiency-explained-polar-night-energys-sand-battery-has-efficiency-up-to-95-per-cent>. [cit. 2024-02-16].
8. ¹ Teplota rozpadu metanu s katalyzátorem. Online. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009250922005152>. [cit. 2024-02-11].
9. ¹ MARK MCCONNACHIE, Mark, Muxina KONAROVA a Simon SMART. International Journal of Hydrogen Energy. Elsevier, 1 August 2023n. l.
10. ¹ MENYING, Liu a Huang ZEAI. SOUTHWEST PETROLEUM UNIVERSITY. Optimized Process for Melt Pyrolysis of Methane to Produce Hydrogen and Carbon Black over Ni Foam/NaCl-KCl Catalyst [online]. [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/2/360>
11. ¹ BÁBORSKÝ, Tomáš. VODÍKOVÉ NÁDRŽE PRO AUTOMOBILNÍ APLIKACE. Online. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=147124. [cit. 2024-02-11].
12. ¹ VYUŽITÍ ODPADU PŘI VÝROBĚ BIOPLYNU. Online, Bakalářská práce. Praha: Universita Karlova, 2015. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63394/F2-BP-2015-Tomasek-Karel-Vyuz%26%23780%3B%20odpadu%20pr%26%23780%3B%20vy%26%23769%3B%20bioplynu.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [cit. 2024-02-25].
13. ¹ [Tráva na suchou tunu]. Online. In: ChatGPT. GPT-3.5 version. Dostupné z: OpenAI, <https://chat.openai.com/c/04cdab00-f2f1-4d80-a08b-379efcae5d61>. [cit. 20234-02-11].
14. ¹ Výhřevnost koksů. Online. Dostupné z: <https://www.opop.cz/vyhrevnost-paliv>. [cit. 2024-02-11].
15. ¹ BÖHM, Pavel. ŽHAVENÍ VLÁKNA ŽÁROVKY. Online. Dostupné z: https://www.vernier.cz/experimenty/bohm/zhaveni_vlakna_zarovky.pdf. [cit. 2024-02-16].
16. ¹ Výpočet emisí CO₂. Online. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/vypocet-emisi-co2/>. [cit. 2024-02-16].
17. ¹ Lze přepočíst kilowatthodiny na kilogramy CO₂? Online. Dostupné z: <https://www.veronica.cz/otazky?i=275>. [cit. 2024-02-16].
18. ¹ Jaké parametry se udávají u kompresorů? Online. Dostupné z: <https://www.airconsult.cz/clanky/blog/jake-parametry-se-udavaji-u-kompresoru>. [cit. 2024-02-16].
19. ¹ Výpočet návratnosti. Online. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/cvekonomika/5_teorie.html. [cit. 2024-02-16].
20. ¹ Náklady na výstavbu bioplynové stanice 1 [online]. [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: <https://finmodelslab.com/blogs/startup-costs/biogas-plant-operations-startup-costs>
21. ¹ Náklady na výstavbu bioplynové stanice 2. Online. Dostupné z: https://energypedia.info/wiki/Costs_of_a_Biogas_Plant#Capital_Costs. [cit. 2024-02-16].

22. ¹ Náklady na výstavbu bioplynové stanice 3. Online. Dostupné z: <https://birchsolutions.co.uk/how-much-does-it-cost-to-build-a-biogas-plant/>. [cit. 2024-02-16].
23. ¹ Cena pece. Online. Dostupné z: <https://acmefurnace.en.made-in-china.com/product/WQPURskYTtRG/China-Acme-China-Vacuum-Pyrolysis-Furnace-Acme-Industrial-Furnace.html>. [cit. 2024-02-17].
24. ¹ Tlaková lahev na vodík. Online. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/70Mpa-Hydrogen-Type-4-Tank-Hydrogen_1600875672661.html?s=p. [cit. 2024-02-17].
25. ¹ jDefinice zisku. Online. Dostupné z: <https://www.kb.cz/cs/podpora/slovník/vyrazy-zacinajici-na-z/zisk#:~:text=Zisk%20je%20roz%C3%AD%20mezi%20v%C3%BDnosy,jedn%C3%ADm%20ze%20z%C3%A1kladn%C3%ADch%20kamen%C5%AF%20kapitalismu..> [cit. 2024-02-17].
26. ¹ Abdullah Akbulut, Oğuz Arslan, Halit Arat, Oğuzhan Erbaş, Important aspects for the planning of biogas energy plants: Malatya case study, Case Studies in Thermal Engineering
27. ¹ Marže pohonných hmot. Online. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/phm-marze/>. [cit. 2024-02-18].
28. ¹ Cena vodíku. Online. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/auto/skokove-zdrazeni-vodiku-v-cesku-provoz-plnicich-stanic-je-pr/r~ff2e8dfaef511ee8b4e0cc47ab5f122/>. [cit. 2024-02-18].
29. ¹ Cena vodíku v Německu. Online. Dostupné z: <https://www.glpautogas.info/en/hydrogen-sale-price-germany.html>. [cit. 2024-02-18].
30. ¹ Cena sazí. Online. Dostupné z: <https://www.procurementresource.com/resource-center/carbon-black-price-trends>. [cit. 2024-02-18].
31. ¹ Údržba bioplynové stanice. Online. In: Bing.com. GPT-4 version. Dostupné z: bing.com, [Copilot s GPT-4 \(bing.com\)](https://bing.com) [cit. 2023-02-11].
32. ¹ Abdullah Akbulut, Oğuz Arslan, Halit Arat, Oğuzhan Erbaş, Important aspects for the planning of biogas energy plants: Malatya case study, Case Studies in Thermal Engineering
33. ¹ Potvrzeno. Regulovaná část ceny elektřiny lidem od ledna zdrazí o tisíce ročně. Online. Dostupné z: <https://novinky.cz/clanek/ekonomika-potvrzeno-regulovana-cast-ceny-elektřiny-lidem-od-ledna-zdrazi-o-tisice-rocne-40452521>. [cit. 2024-02-18].
34. ¹ Příklad realizace projektu: Zemědělská bioplynová stanice Drahobudice. Online. Dostupné z: <https://www.bioplynovestanice.cz/cleneni-bps/>. [cit. 2024-02-24].
35. ¹ Finanční kalkulač pro hodnocení ekonomické efektivity investic. Online. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypočty/110-financni-kalkulator-pro-hodnoceni-ekonomicke-efektivnosti-investic>. [cit. 2024-02-24].
36. ¹ ČNB. Jak se vyvíjela diskontní sazba ČNB? Online. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/casto-kladene-dotazy/Jak-se-vyvijela-diskontni-sazba-CNB/>. [cit. 2024-02-24].
37. ¹ SOLAR GLOBAL. SG Hydrogen Napajedla. Online. Dostupné z: <https://www.solarglobal.cz/vodik>. [cit. 2024-02-25].
38. ¹ ČESKÁ VODÍKOVÁ TECHNOLOGICKÁ PLATFORMA Z.S. Základní informace k vodíku. Online. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>. [cit. 2024-02-25].

12 Seznam obrázků a tabulek:

Obrázek 1: Anaerobní digesce.....	10
Obrázek 2: Grafické zpracování projektu	13
Obrázek 3: Graf teploty procesu výtěžnosti	16
Obrázek 4: Schéma pyrolitického kotle	17
Obrázek 5: Energetická olympiáda	27
Tabulka 1: výnosnost bioplynu podle druhu odpadu.....	14
Tabulka 2: Výsledky.....	24